

城市轨道交通直流牵引供电网短路故障分析

王乃永¹, 艾 兵², 李 静¹, 曹 晖¹, 吴广宁²

(1. 陕西省西安供电局, 陕西 西安 710032; 2. 西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘 要: 直流供电网故障分析对整个城市轨道交通系统的规划设计、设备选型、保护配置与整定都起着举足轻重的作用。若地铁直流供电系统内部出现故障, 有可能对整个电网造成严重影响。本文应用 Matlab/Simulink 软件对地铁牵引供电系统中的整流器和直流系统进行建模, 分析了整流器的运行特性, 研究了直流供电网在近端短路和远端短路情况下系统的动态响应, 为优化设计、指导直流供电系统的参数设置和系统调试提供了有价值的参考。

关键词: 直流牵引供电系统; 整流器; 短路故障

中图分类号: U231+.8

文献标识码: A

文章编号: 1671-8410(2010)03-0024-04

Analysis of Short-circuit Fault in DC Traction Power Supply System for Urban Mass Transit

WANG Nai-yong¹, AI Bing², LI Jing¹, CAO Hui¹, WU Guang-ning²

(1. Xi'an Electric Power Supply Bureau, Xi'an, Shaanxi 710032, China;

2. Electrical Engineering College, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: Fault analysis of DC traction power supply system plays an important role in programming and designing, equipment choice, scheme protection and debugging of the whole urban mass transit. The whole power grid may be influenced badly if the metro DC power supply system suffers short-circuit fault. It presents a model of rectifier and DC system for metro traction power supply system based on Matlab/Simulink, analyzes the operation characteristic of the rectifier, researches dynamic response of the close short-circuit and the distant short-circuit fault for DC power supply system, which provides a valuable reference for the design optimization, parameter setting and system debugging.

Key words: DC traction power supply system; rectifier; short-circuit fault

0 引言

随着我国经济的发展, 城市建设规模在不断扩大, 许多大中城市轨道交通的规划和建设已提上议事日程。直流牵引系统的安全可靠运行是整个城市轨道交通安全畅通运行的基础^[1~3]。西安市在建地铁线路有6条, 全

部采用24脉波整流和DC 1500 V牵引供电制式。一旦地铁牵引供电系统出现故障, 可能对整个西安市电网造成严重影响, 因此对直流牵引供电系统的故障分析及其相关问题的研究十分重要。

近年来, 国内城市轨道交通发展迅速, 但对于城市轨道交通直流供电系统故障机理的研究却较滞后。交直流变换过程对直流供电网的影响和直流牵引网轨道暂态电气参数变化对暂态过程的影响是直流供电系统故障分析中的难点, 其关键在于交直流变换过程的计算与分析 and 牵引网轨道暂态电气参数的建模与计算。

收稿日期: 2010-04-02

作者简介: 王乃永(1968-), 男, 高级工程师, 从事电网规划及电网建设相关工作和研究;

艾 兵(1985-), 男, 在读硕士研究生, 主要从事电气化铁道和地铁牵引供电系统方面的研究。

交直流变换系统是直流牵引供电系统的一个关键环节,对其进行详细地建模分析是直流牵引供电系统运行与故障机理研究的基础之一。本文采用Matlab/Simulink软件对直流供电网系统进行建模与仿真计算,详细地分析了24脉波整流装置的运行工况以及理想状态下的整流特性,系统地研究了直流供电网短路故障暂稳态过程。

1 城市轨道交通直流供电系统

在城市轨道交通供电系统(图1)中,一般将整个电力系统分为3大部分:①电源系统,指由城市公共电网提供的交流电源点,如110 kV、35 kV或10 kV等;②直流供电系统,主要包括降压整流系统、直流牵引网等;③内部变电/配电系统。

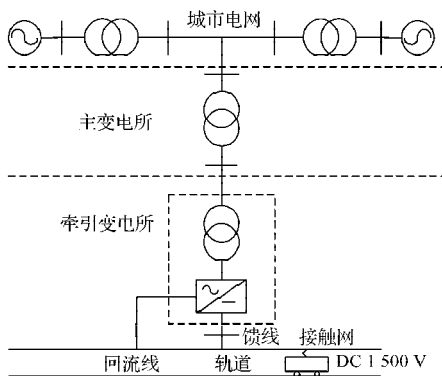


图1 地铁供电系统

Fig.1 Metro power supply system

地铁供电系统负责为车辆及供电设备提供动力能源,一般包括高压供电系统(外部电源,即城市电网)和地铁内部供电系统2大部分。地铁内部供电系统由牵引供电系统和动力照明供电系统组成^[3]。牵引供电系统中的牵引变电所将三相高压交流电变成适合电动车辆运用的低压直流电,馈电系统再将牵引变电所的直流电送到接触网上,电动车辆通过受流器与接触网接触而获得电能。

2 整流器运行特性分析

2.1 整流器仿真建模

整流机组是地铁牵引供电系统的关键设备之一,主要完成交流到直流的转换。西安地铁牵引供电系统采用24脉波不可控桥式整流机组(图2)。

2台12脉波整流器并联运行,当整流变压器高压网侧并联的绕组分别采用 $\pm 7.5^\circ$ 外延三角形连接时,即可构成24脉波整流方式。为使2台整流变压器在网侧实现 $\pm 7.5^\circ$ 的移相,在整流变压器一次侧采用延边三角形接法。

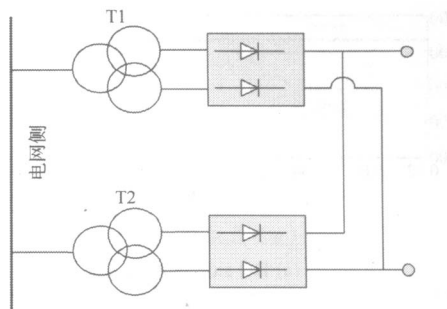
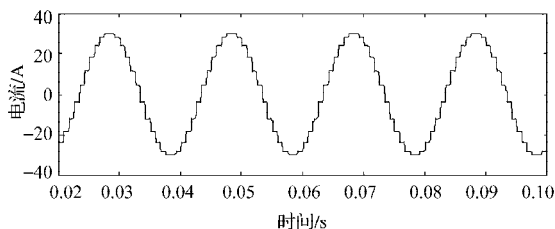


图2 24脉波整流机组

Fig.2 24-pulse rectifier

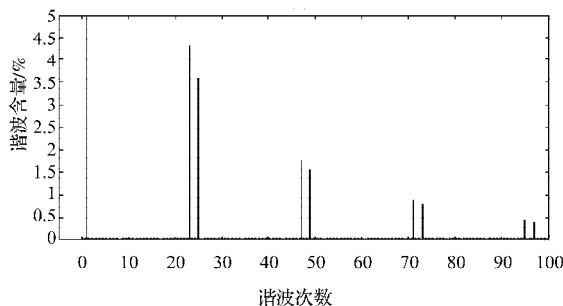
2.2 整流器运行特性

对于24脉波整流方式,理想状态下,网侧电流中只含有23次、25次等 $24n \pm 1$ 次特征谐波。利用整流器仿真模型计算得到35 kV网侧电流波形和频谱(图3)。



(a) 35 kV 网侧电流

(a) Current on the 35 kV grid-side



(b) 谐波分析

(b) Harmonic analysis

图3 35 kV 网侧电流波形和频谱

Fig.3 Wave and frequency spectrum of 35 kV grid-side current

24脉波整流机组输出直流电压和频谱仿真结果如图4所示。可以看出,24脉波整流器直流电压特征谐波为 $24n$ 次。

地铁供电系统中,采用24脉波整流机组给机车供电,是减少电网中谐波含量的重要措施之一。运行结果表明,用24脉波整流机组代替12脉波整流机组,谐波电流总含量降低30%以上,其中11次、13次谐波电流含量约降80%,大大降低了高次谐波对电网的影响。

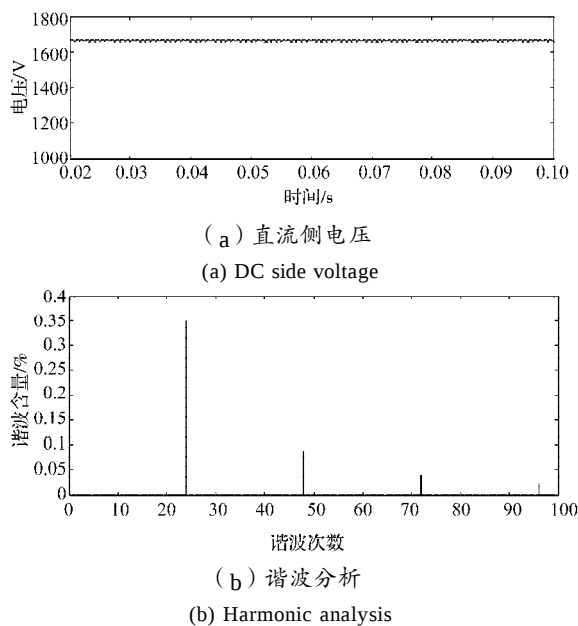


图4 24脉波整流器输出波形及频谱

Fig.4 Output voltage wave and frequency spectrum of 24-pulse rectifier

3 直流短路故障分析的工程意义

直流牵引网线路保护是保障牵引系统安全运行的一个重要环节。与交流系统相比,直流牵引系统在结构、运行方式以及故障特征方面存在着较大的差异,使得直流牵引系统线路保护的实现也有其独特之处,需要具体问题具体分析。

在地铁供电系统中,短路故障分析极其重要,通过它可以正确地进行设备选择,整定直流开关及保护装置,验证直流牵引供电系统运行的可靠性并校核测试段牵引直流回路的完整性。

高速直流断路器作为大电流故障的主保护装置,隔断线路正负极间金属性或近端经小过渡电阻的大电流。根据直流牵引系统的故障特点,当直流侧近端发生正负极直接金属性短路时,电流上升率很大,故障电流甚至可高达到数万安培,此时直流断路器本体大电流脱扣须可靠、迅速地动作以切断故障电流。对于高速直流断路器本体大电流脱扣的整定,当采用双端供电方式时,其整定保护范围应该大于线路的一半,避开机车正常运行时可能产生的最大负荷电流峰值,并考虑一定的可靠性系数。

从未来发展来看,为了减少地铁牵引供电系统内部故障,需要构建先进的城市轨道交通电力综合自动化系统。

4 直流短路故障分析

4.1 直流短路故障

变电站出口短路故障(即牵引变电所直流侧出口近

端短路)及远方短路故障(即牵引网远方短路)均需靠馈线断路器加以排除。近端短路故障发生时,系统流过的故障电流最大(图5中A点);而远方短路故障(图5中B点)大都难以识别,因为系统总阻抗的增加导致故障电流和正常的负荷电流(特别是机车起动电流)间难以区分。地铁远方短路故障保护是地铁电气中的研究热点。

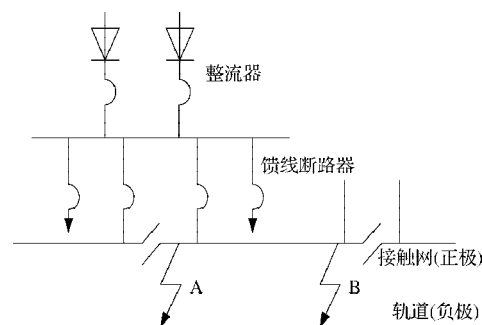


图5 地铁牵引供电系统短路故障示意图

Fig.5 Short-circuit fault diagram of metro traction power supply system

在整流机组供电的牵引网发生直流短路故障的暂态过程中,暂态电流为:

$$i_d = \frac{U_{d0}}{R_\Sigma} (1 - e^{-R_\Sigma \cdot t / L_\Sigma}) \quad (1)$$

式中: U_{d0} ——牵引网直流电压; R_Σ ——牵引网总电阻,包括交流电源等效电阻(每相)和直流短路回路电阻; L_Σ ——牵引网总电感,包括交流电源电感(每相)和直流短路回路电感; t ——短路故障持续时间。

4.2 仿真分析

4.2.1 近端短路故障

当牵引变电所出口近端发生短路故障时,会产生很大的暂态冲击电流,其大小受交直流系统参数以及整流器换阀过程的影响,因此仿真分析时必须考虑详细的交直流计算模型,即24脉波整流器模型。系统故障分析模型如图6所示。

若要精确地计算地铁近端短路故障电流的大小,则须考虑铁轨的阻抗值。钢材作为铁轨材料为铁磁质,具有比较大的磁化率,易受集肤效应的影响,其阻抗在整个暂态过程中随频率的改变而改变。以往,计算短路电流时,只简单地以直流电阻值或50 Hz频率下的阻抗值(可以通过实测来确定)表示铁轨阻抗值,计算误差大。若参考双曲线拟合计算短路电流,即使用DC~50 Hz之间的某个频率值来计算铁轨阻抗,其计算结果的准确度大大提高。仿真时, L_{ext} 表示每公里轨道外层电感量(0.79 mH); R_3 、 L_3 分别表示架空接触网每公里电阻值(0.028 Ω)和每公里内电感量(2.662 9 mH); R_1 、 R_2 和 L_1 、 L_2 分别表示走行轨每

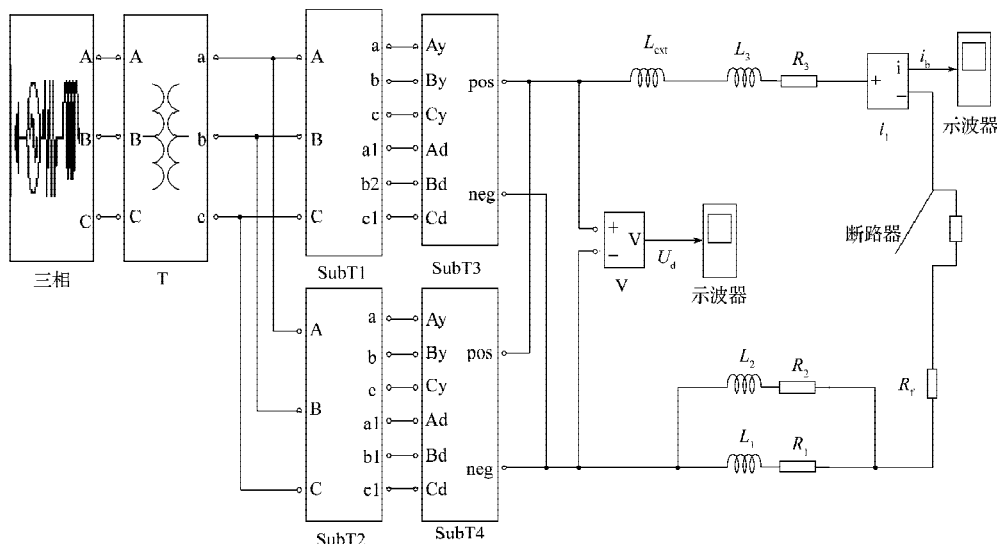


图6 Simulink 系统故障仿真模型

Fig.6 System fault model established by Simulink

公里电阻值($0.023\ \Omega$)和每公里内层电感量($1.78\ \text{mH}$); R_f 为故障过渡电阻($0.004\ \Omega$)。在单端供电的情况下,假设在牵引网近端 $0.05\ \text{km}$ 处短路,则整流变电所输出短路电流仿真结果如图7所示。可以看出,牵引变电所近端短路时,流经短路点的短路电流在几毫秒内能上升至几万安培,可见短路故障对供电系统的危害程度非常大。为保障供电网络安全运行,必须设置保护装置。

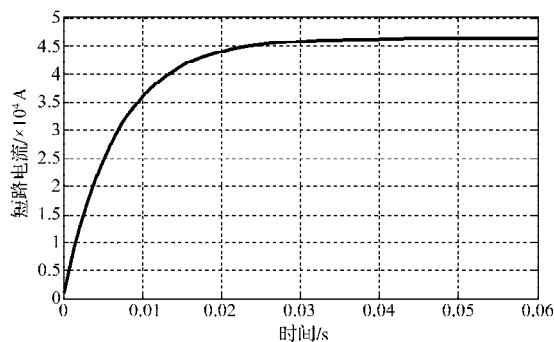


图7 牵引供电网 0.05 km 处短路电流仿真结果

Fig.7 Simulation result of short-circuit current at 0.05 km away from traction power supply system

4.2.2 远端短路故障

分析远方短路故障时,变电站中整流器的作用可以忽略,因为此时起关键作用的是牵引网的铁轨系统,即由牵引网轨道电气参数主导暂态变化。铁轨阻抗的变化范围大是因为铁轨作为导体有着其它导体所不明显的集肤效应。在短路的起始阶段,电流主要集中在铁轨的外围,铁轨的中心几乎没有电流流过,随着时间的推移,电流逐渐均匀分布在铁轨的整个截面上,因此,起始时刻电阻比后期电阻大。

当发生远端故障时,故障暂态冲击现象逐渐消失,

电流只呈现类似于指数曲线的变化特征,这时整流变电所可以等效为直流电压源串联一个常数值阻抗。直流牵引网远方短路故障仿真计算电路如图8所示,其中 E_d 为整流空载直流电压, R_e 、 L_e 分别为整流变电所等效串联电阻和电感。

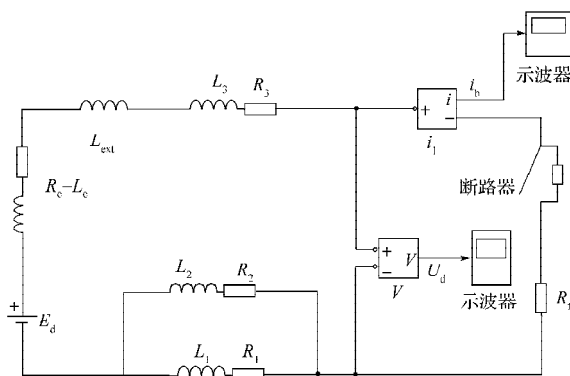


图8 直流牵引供电网远方短路故障计算电路

Fig.8 Calculation circuit of distance short-circuit fault for DC traction power supply system

在计算地铁远方短路的整流变电所的等效模型时,可用直流电压源串联一个常数值阻抗等效,其中仿真参数 $E_d=1593\ \text{V}$, $R_e=40.77\ \text{m}\Omega$, $L_e=57.59\ \mu\text{H}$,其它仿真参数与近端短路故障的相同。假设牵引网在远端 $4\ \text{km}$ 处发生短路,整流变电所输出短路电流的仿真结果如图9所示。可以看出,短路电流暂态过程波形遵循指数增长规律,这可用简单的一阶电路原理解释:一个由直流电源、电阻和电抗串接而成的一阶电路在短路的初始暂态过程中,电流呈指数增长,即短路电流呈现与暂态短路电流理论计算公式相同的指数分布。

(下转第32页)

时,只使用气象数据可能会缩短预测时间。文中选择的模型有FFNN、RBFNN和RNN。尽管每个月的结果混合在一起,仿真结果表明,某些月份RBFNN和RNN优于FFNN。提出的神经网络法的合理性在未来24 h预测仿真中得到证实。

参考文献:

- [1] Philip D Wasserman. Neural Computing: Theory and Practice[C]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1989.
- [2] Adnan Sozen, Erol Arcakhoglu, Mehmet Ozalp, et al. Forecasting based on neural network approach of solar potential in Turkey[J]. Renewable Energy, 2005, 30(7): 1075-1090.
- [3] Hamdy K Elminir, Faiz F Areeed, Tarek S Elsayed. Estimation of solar radiation components incident on Helwan site using neural networks[J]. Solar Energy, 2005, 79(3): 270-279.
- [4] 王灵敏, 宋希庚, 薛冬新. 基于神经网络的热气功率预测[J]. 振动、测试与诊断, 2002, 22(2): 127-131.
- [5] Mohandes M, Balghonaim A, Kassas M, et al. Use of Radial Basis Functions for Estimating Monthly Mean Daily Solar Radiation[J]. Solar Energy, 2000, 68(2): 161-168.
- [6] 冬雷, 王丽婕. 基于混沌时间序列的大型风电场发电功率预测建模与研究[J]. 电工技术学报, 2008, 23(12): 125-129.
- [7] 张颖, 高中文. 基于时间序列和神经网络的电力系统负荷预测[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2003, 8(1): 30-36.

(上接第27页)

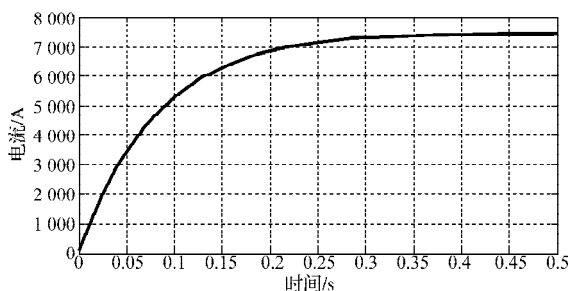


图9 牵引供电网4 km处短路电流仿真结果

Fig.9 Simulation result of short-circuit current at 4 km away from traction power supply system

为了保证可靠供电,地铁一般采用了双端供电方式,而上述直流短路故障的分析是基于当其中某一中心变电所在需检修等情况下而退出对地铁供电后,地铁供电网处于单端供电的状态。双端供电方式下的直流短路故障特性与单端供电方式下直流短路故障特性相似,因为该供电方式下提供的直流网电压同样是

1 500 V,不同之处在于牵引网容量的大小。当发生近端短路和远端短路故障时,其计算电路与图6和图8相同,故短路电流运行趋势一致。

5 结语

本文在介绍地铁供电系统的结构和分析整流机组特性的基础上,利用仿真分析了直流牵引网的短路故障电流特性,总结了地铁直流供电系统近端短路和远端短路故障电流的规律。研究成果为指导西安地铁牵引系统的参数设置和系统调试提供了参考,而直流牵引网线路保护的配置精确设定尚需进行进一步的研究。

参考文献:

- [1] 郑瞳炽, 张明锐. 城市轨道交通牵引供电系统[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2003.
- [2] 何宗华. 城市轨道交通发展方向的技术策略[J]. 城市轨道交通研究, 2001(1): 1-6.
- [3] 朱卫国. 城市轨道交通综述[J]. 城市车辆, 2001(3): 37-40.

《大功率变流技术》

欢迎 订阅 赐稿 刊登广告